

THESIS

MUNICH

1967

UNTERSUCHUNGEN ZUR ABHÄNGIGKEIT DER INSENSIBLEN
HAUTWASSER-ABGABE VON DER LUFTFEUCHTE

SILKE HEBERLEIN

MÜNCHEN

1967

LANE MEDICAL LIBRARY OF
STANFORD UNIVERSITY
300 PASTEUR



Digitized by the Internet Archive
in 2026

AUS DEM BALNEOLOGISCHEN INSTITUT

DER UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Vorstand: Prof. Dr. H. v. Braunbehrens

Untersuchungen zur Abhängigkeit der insensiblen

Hautwasser-Abgabe von der Luftfeuchte

INAUGURAL-DISSERTATION

zur Erlangung der Doktorwürde in der gesamten Medizin
verfaßt und einer Hohen Medizinischen Fakultät
der Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von

Silke Heberlein

aus

Berlin

München 1967

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität München

Berichterstatter: Dipl.-Phys. K. Dirnagl

Mitberichterstatter: Prof. Dr. H. v. Braunbehrens

Dekan: Prof. Dr. M. Kiese

Tag der mündlichen Prüfung: 4. 4. 1967

<u>Inhaltsverzeichnis:</u>	<u>Seite:</u>
A.) <u>Einleitung</u>	1
B.) <u>Literaturbesprechung</u>	2
C.) <u>Problemstellung</u>	6
D.) <u>Methode</u>	7-21
1.) Meßapparatur	7
2.) Eichung des Meßapparates	10
3.) Herstellung verschiedener, definierter Luftfeuchtgrade	10
4.) Beschreibung des Versuchsablaufes	12
5.) Empfindlichkeit des Meßgerätes	14
6.) Auswertung der Versuche	19
E.) <u>Ergebnisse</u>	22-34
F.) <u>Diskussion</u>	34-47
1.) Unterschiede in der insensiblen Schweißdrüsensekretion	37
2.) Änderung des Diffusionswiderstandes	39
G.) <u>Zusammenfassung</u>	48
H.) <u>Literaturverzeichnis</u>	50
I.) <u>Lebenslauf</u>	55

Fotodruck: Mikrokopie GmbH, München 22, Bruderstraße 9

A.) Einleitung

Nach Marchionini (21) ist die perspiratio insensibilis die ohne Mitwirkung der Schweißdrüsen zustandekommende transepidermale Wasserverdunstung an der Hautoberfläche. Diese Definition beruht auf der Vorstellung, daß die perspiratio insensibilis (p.i.) ein passiver, nur physikalischen Gesetzen gehorchender Vorgang ist und schließt die Beteiligung aktiver oder exkretorischer Prozesse aus. Durch Untersuchungen, die später in der Literaturübersicht besprochen werden, ist diese Auffassung neuerdings in Frage gestellt.

Individuelle Unterschiede und Schwankungen in der Höhe der p.i. sind nach bisherigen Feststellungen bedingt durch Alter, Geschlecht, Hauttemperatur, Grundumsatz und den vegetativen Zustand der Versuchsperson. Klima, Windgeschwindigkeit, Lufttemperatur und -feuchtigkeit müssen als äußere Einflüsse berücksichtigt werden.

B.) Literatur

Frühere Untersuchungen zu dieser Frage ergaben übereinstimmend, daß beim Menschen die Hautwasserabgabe (HWA) mit steigendem Wasserdampfdruck der umgebenden Luft absinkt. Doch kamen die einzelnen Autoren zu voneinander abweichenden Kurven.

Thauer (17) und Mitarbeiter führten Versuche am praktisch schweißdrüsenlosen Hund durch. Sie erhielten eine lineare Beziehung zwischen dem Wasserverlust durch die Haut und der Differenz zwischen dem Sättigungsdruck bei Hauttemperatur und dem Wasserdampfdruck der Luft. Das bedeutet, daß es sich beim unnarkotisierten Hund im thermoindifferenten Bereich um einen reinen Diffusionsprozeß handelt, der keineswegs humoral oder nervös gesteuert wird.

Versuche dieser Autoren am ganzen Menschen brachten jedoch keine lineare Beziehung zwischen HWA und der Dampfdruckdifferenz. Sie ergaben eine Potenzfunktion von parabolischem Charakter. Diesen Kurvenverlauf erklären Thauer, wie auch Lütcke, Klusmann und Kaufmann (16, 17, 18, 19, 30) mit einer Abnahme der Wasserdurchgangszahl ($\text{g/m}^2 \times \text{h} \times \text{mm Hg}$) bei geringer Luftfeuchtigkeit.

Zu einer prinzipiell ähnlichen Potenzfunktion kam Kerslake (9). Quantitativ allerdings wichen

seine Ergebnisse von denen Thauers ab.

H e e r d und O h a r a (14) erhielten dagegen auch beim Menschen eine lineare Abhängigkeit zwischen Hautwasserverlust und dem Dampfdruck, der über einer gesättigten Lösung eines Absorptionsmittels bei einer bestimmten Temperatur in einer Kapsel herrscht, welche auf eine 10 cm^2 große Hautfläche gebracht wurde. Dieses Ergebnis würde für einen reinen, durch keinerlei zusätzliche Einflüsse modifizierten Diffusionsvorgang sprechen. Die gefundene Gerade schneidet die Abszisse beim Sättigungsdruck der Hauttemperatur. Ein solches Verhalten ist nur möglich, wenn sich der Diffusionswiderstand der Haut bei den vorkommenden Temperaturen nicht verändert.

Heerd und Ohara meinen deshalb, daß die mutmaßliche Abnahme des Diffusionswiderstandes der Haut bei Thauer u.a. durch Änderungen einer makroskopisch unmerklichen "Ruhe"-Sekretion der Schweißdrüsen entsteht. Bei ihren Ergebnissen erklären sie damit die große Streuung der Werte. Die geringe Schweißmenge soll bereits in der Tiefe verdunsten und durch das stratum corneum als Dampf hindurchdiffundieren. Daraus würde folgen, daß die Wasserdampf-abgabe der Haut aus einem Diffusions- und einem von der Ruhesekretion der Schweißdrüsen gebildeten Anteil zusammengesetzt ist.

Dieser Ansicht ist auch R o t h m a n n (25). Er

schreibt auch, daß die Menge der p.i. nicht an jeder Hautstelle des Körpers gleich ist.

Thauer und Mitarbeiter errechneten die HWA aus der perspiratio insensibilis des ganzen Menschen durch Abzug der Wasserdampfabgabe der Lunge und der O_2 - CO_2 -Differenz der Atemluft. Bei diesem Verfahren, bei dem also die Wasserabgabe der gesamten Hautoberfläche des Menschen mit in die Messung eingeht, ist nicht ausgeschlossen, daß eventuelle emotionelle oder apokrine Sekretion mit gemessen wird.

Da die Haut auch kaum als einheitliches Organ betrachtet werden kann und deshalb die Deutung der Befunde am gesamten menschlichen Körper erschwert wird, führten Heerd und Ohara ihre Versuche an einer kleinen Fläche an der proximalen Innenseite des linken Unterarmes durch. Das ist eine Hautstelle mit nicht zu starkem stratum corneum, mittlerer Schweißdrüsendichte, frei von apokrinen Drüsen, nicht zu stark behaart und nicht zu emotionellem Schwitzen neigend.

B ü t t n e r (10, 11) benutzte die gleiche Hautstelle. Dabei wurde davon ausgegangen, daß die Verdunstung von einer unterhalb der Hautoberfläche gelegenen Stelle erfolgt, deren Feuchtigkeit ungefähr 100 % beträgt. Der Dampfdruck dieser Stelle ist bei nicht zu starkem stratum corneum annähernd gleich dem Sättigungsdruck bei Hauttemperatur. Bei einer Dicke des stratum corneum von

höchstens 0,05 mm (12) beträgt das Temperaturgefälle noch nicht 0,1° C.

Büttner, wie auch Rothmann u.a., nimmt die tiefere, dichtere Schicht (*stratum conjunctum*) des *stratum corneum* als "Barriere" für die Wasserverdunstung an. Die abgegebene Wasserdampfmenge wird von der Differenz der Dampfdrücke diesseits und jenseits der Barriere bestimmt. Handelte es sich wirklich nur um einen rein physikalisch gesteuerten Vorgang, müßte bei unverändertem Diffusionswiderstand und Gleichheit der Dampfdrücke auf beiden Seiten der Barriere die Wasserabgabe sistieren. In Wirklichkeit würde dies nur einen mengenmäßig gleichen Ein- und Ausstrom bedeuten, nicht ein Aufhören jeglichen Durchflusses. Büttner fand dies jedoch schon bei einem Dampfdruck der umgebenden Luft von 21 mm Hg gegenüber einem Sättigungsdruck von etwa 42 mm Hg bei einer Hauttemperatur von 35° C. Er behauptet außerdem, daß der Widerstand der Barriere an der gleichen Hautstelle bei trockenen Bedingungen 3-4 mal höher ist als bei feuchten.

Es stehen sich also drei Hypothesen gegenüber:

1. Der Wasserverlust der Haut beruht auf einem reinen Diffusionsvorgang, der Barrierenwiderstand bleibt konstant. Bezugspunkt in der Haut ist der Dampfdruck reinen Wassers oder einer Salzlösung. Die Wasserabgabe ist gleich Null, wenn der Dampfdruck

der umgebenden Luft (p_L) so hoch ist wie der in der Haut (p_H), wenn $p_L = p_H$.

2. Passive Diffusion bei veränderlichem Diffusionswiderstand.
3. Beteiligung sowohl passiver Diffusion als auch aktiver Exkretion.

Durch Arbeiten am Balneologischen Institut von Angele wurde die letzte Hypothese bestätigt (1). Er erhielt nach Ausschalten der Schweißdrüsentätigkeit mit Agaricin an allen gemessenen Körperstellen eine geringere Wasserabgabe. Nur das Ausmaß der Erniedrigung war regional verschieden.

C.) Problemstellung

Nach den obigen Ausführungen bleibt also nur noch die Frage offen, ob der Diffusionswiderstand eine konstante oder eine veränderliche Größe ist. Da die Abweichung von der physikalischen Gesetzmäßigkeit vor allem bei geringen Luftfeuchtigkeiten auftritt, wurden die vorliegenden Versuche nur in einem Bereich von 3 bis maximal 14 mm Hg durchgeführt. Gemessen wurde an der proximalen Innenseite des linken Unterarmes. Wie Angele feststellte, ist hier die Beteiligung der glandulären Hautwasserabgabe am geringsten und dadurch die Fehlerquelle reduziert. Messungen der Wasserabgabe an dieser

Hautstelle bei verschiedenen Luftfeuchtigkeiten sollten nähere Aufschlüsse über das Verhalten des Diffusionswiderstandes bringen.

D.) Methode

Zur Lösung der gestellten Aufgabe wurde ein neues Meßverfahren benutzt, das die fortlaufende Registrierung eines über die Haut hinwegstreichenden Luftstromes gestattet. Der Meßeffect beruht auf Infrarotabsorption in den spezifischen Absorptionsbanden des Wasserdampfes.

1.) Meßapparatur (s. Abb.1)

Die von zwei Strahlungsquellen ausgesandten Infrarotstrahlen durchlaufen zwei Meßküvetten. Zur Beseitigung von auf den Empfänger einwirkenden Störeinflüssen werden sie periodisch und gleichzeitig unterbrochen. Die durch die Küvetten geschickten Luftströme absorbieren einen Teil der Infrarotstrahlung, wobei die Menge der absorbierten Strahlungsenergie von der Konzentration des Gases, in diesem Fall von dem Wasserdampfgehalt der Luft, abhängig ist.

Der Empfänger besteht aus zwei volumengleichen Kammern und absorbiert die Strahlung nur in den Absorptionsbanden des Wasserdampfes. Die daraus sich ergebenden Temperatur- und Druckschwankungen übertragen sich als periodische Schwingungen auf eine

spannte Metallmembran, die die Kammern trennt. Der Membran gegenüber befindet sich eine feste Gegenelektrode. Beides zusammen bildet einen Kondensator, dessen durch die Membranschwingungen hervorgerufenen Kapazitätsschwingungen einen periodischen Ladestrom bewirken. Dieser wird verstärkt und einem Anzeigeinstrument zugeführt.

Erläuterungen zu Abb.1

P ist die Pumpe, die Raumlufte vor Versuchsbeginn in den Luftsack pumpt.

P_1 und P_2 saugen während des Versuches Luft aus dem Sack und blasen sie in den Kreislauf, der der eingestellten Stellung am Vielfach-Hahn entspricht.

U_1 = Blaugel

U_2 = Phosphorpentoxyd

Mm = Metallmembran im Empfänger

Vom Luftsack aus kann die Luft entweder sofort zu den Vielfachhähnen, oder erst über den Trockenturm beziehungsweise den Kältethermostaten geleitet werden. Drosselschrauben verschließen die nicht benützten Wege.

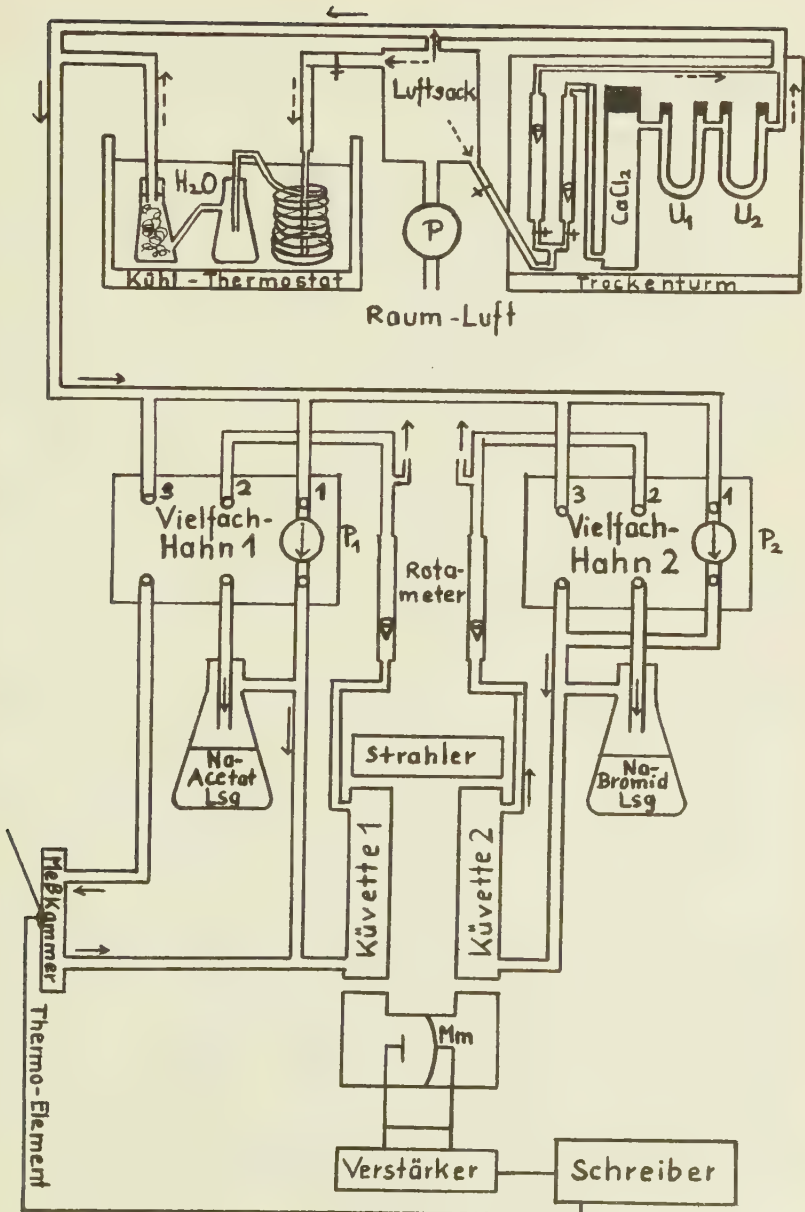


Abb.1 Schematische Versuchsanordnung

2.) Eichung des Meßapparates

a) Nullpunkt (Stellung 1)

Durch die beiden Küvetten fließt Luft gleicher Feuchtigkeit aus einem Plastiksack. Der Ausschlag muß 0 sein.

b) Endpunkt (Stellung 2)

In einem Wasserbehälter befinden sich zwei Erlenmeyerkolben mit zwei verschiedenen gesättigten Salzlösungen. Kolben 1 enthält NaBr-Lösung, Kolben 2 NaAc. Bei einer Wassertemperatur von 20°C stellt sich über NaBr ein Wasserdampfdruck von 13,2 Torr und über NaAc von 10,1 Torr ein. Die Differenz von 3,1 Torr wird am Linienschreiber so eingestellt, daß sie bei 3,1 Skalenteilen angezeigt wird. Einem Skalenteil entspricht dann ein Torr Dampfdruckdifferenz zwischen beiden Küvetten.

3.) Herstellung verschiedener, definierter Luftfeuchtegrade

Vor Versuchsbeginn wurde zur Erhaltung konstanter Luftverhältnisse Raumluft in einen Plastiksack gepumpt. Aus der Temperatur und der mit einem Präzisionspsychrometer gemessenen relativen Feuchte errechnete sich der Wasserdampfgehalt in mm Hg.

Luft geringerer Feuchte wurde auf zwei verschiedene Arten erzeugt:

- a) Die aus dem Plastiksack gepumpte Luft durchläuft eine Kupferschlange, die im Kühlwasser eines Kältethermostaten (Kryomat) liegt. Hinter die Kupferschlange sind, ebenfalls noch im Wasser liegend, eine Tropfflasche und eine mit Glaswolle gefüllte Flasche geschaltet, um eventuell mitgerissene Wassertropfen zu entfernen. Die Luft enthält dann eine dem Sättigungsdampfdruck des Kühlwassers entsprechende Wasserdampfspannung. Der Kryomat läßt sich auf Temperaturen zwischen 0 und 40° C einstellen. Die Abkühlungsgeschwindigkeit beträgt maximal 2,5°/min.
- b) Vom Plastiksack aus wird die Luft über einen Verzweigungshahn an zwei Rotameter (Strömungsmesser) geleitet. Durch Rotameter 1 läuft die Luft unverändert. Die Luft in Rotameter 2 wird über CaCl_2 , Blaugel und Phosphorpentoxyd getrocknet. Beide Luftströme werden dann wieder in genau meßbarem Mischungsverhältnis vereinigt. Durch Vergrößern des Trockenluftanteils und entsprechendes Verringern des feuchten läßt sich der Wasserdampfgehalt des Gemisches immer weiter herabsetzen. Durch Ausschalten des feuchten Anteils erhält man vollkommen trockene Luft.

Methode a) - Kryomat - hat den Vorteil, daß man über die Kühlwassertemperatur, die auch auf dem Linienschreiber angezeigt wird, jederzeit über die Luftfeuchtigkeit orientiert ist. Man kommt mit ihr aber nur bis zu einem Dampfdruck von 4,58 mm Hg, dem Sättigungsdampfdruck des Wassers bei 0° C.

Methode b) - Trockenturm - hat den Nachteil, daß sich das Phosphorpentoxyd verhältnismäßig rasch verbraucht und dementsprechend oft erneuert werden muß.

Beide Verfahren erlauben keine Feuchtigkeiten herzustellen, die über dem Sättigungsdruck der Lufttemperatur liegen, weil das Wasser in den Schläuchen wieder auskondensieren würde. Aber auch Feuchtigkeiten, die über dem gerade bestehenden Wasserdampfgehalt der Luft lagen, waren mit den verfügbaren technischen Mitteln nicht herstellbar. Eine hinter den Plastiksack zum Befeuchten der Luft versuchsweise geschaltete Fritte stellte einen unüberwindlichen Widerstand im Strömungssystem dar. Die erforderliche Geschwindigkeit von 0,5 l/min konnte nicht aufrecht erhalten werden. Der zum Durchtreiben benötigte Druck hätte außerdem die physiologischen Verhältnisse auf der Haut gestört.

4.) Versuch (Stellung 3)

Aus dem Plastiksack wird Luft über den Kryomaten oder den Trockenturm von zwei Membranpumpen angesaugt und

zwei verschiedenen Kreisläufen zugeteilt. In beide Kreisläufe sind Strömungsmesser geschaltet, um die Strömungsgeschwindigkeit konstant auf 0,5 l/min halten zu können. Luftstrom 2 wird direkt in Küvette 2 geleitet. Luftstrom 1 fließt in eine Kammer von 38 cm² Fläche und 6 mm Höhe, die der Hautstelle luftdicht aufliegt. Die aus der Kammer strömende Luft kommt dann in die erste Küvette und enthält gegenüber Luftstrom 2 zusätzlich den von der Haut abgegebenen Wasserdampf. Die Wasserdampfdifferenz zwischen beiden Küvetten entspricht bei vorgegebener Strömungsgeschwindigkeit also unmittelbar der von der Haut abgegebenen Wasserdampfmenge und wird am Linienschreiber in Skalenteilen = Torr abgelesen.

Ohne die Kammer von der Haut zu entfernen, wurde die Luftfeuchtigkeit auf die oben beschriebenen Arten nach und nach verringert. Bei jeder Versuchsperson wurden mit beiden Methoden Messungen durchgeführt. Ein Versuch war erst dann abgeschlossen, wenn mit dem Kryomaten 4,58 oder mit dem Trockenturm 0 Torr erreicht waren.

In die Kammer eingebaut, auch auf der Haut liegend, mißt ein Temperaturfühler während des Versuches die Hauttemperatur, die neben der HWA auf dem Linienschreiber registriert wird. Versuche mit und ohne Temperaturfühler ergaben, daß weder die Wasserabgabe

der Haut noch die Strömungsgeschwindigkeit von ihm beeinflußt werden.

Die Raumtemperatur änderte sich während der Dauer eines Versuches von maximal 60 Minuten nicht und lag zwischen 23 und 25° C. Eine Stunde vor Versuchsbeginn hielt sich die Versuchsperson bereits im Raum auf, um sich an die Umgebungsverhältnisse zu gewöhnen. Während des Versuches ruhte sie auf einer Liege. Außerdem wurde darauf geachtet, daß sie sich thermindifferent fühlte. Sie durfte vorher auch keine schwere Arbeit geleistet und keine großen Mahlzeiten zu sich genommen haben.

5.) Empfindlichkeit des Meßgerätes

Die Gleichsetzung Skalenteile = Torr am Linienschreiber gilt nur dann in allen Meßbereichen, wenn der Apparat gegenüber allen Konzentrationen des Meßgases die gleiche Empfindlichkeit hat. Da dies nicht bekannt war, mußte diese Frage erst geklärt werden. Die Versuche hierzu wurden im Prinzip so durchgeführt, daß zwischen beiden Küvetten ein bestimmter Konzentrationsunterschied eingehalten, die Feuchtigkeit in beiden aber stufenweise herabgesetzt wurde. Um ein möglichst genaues und gesichertes Ergebnis zu erhalten, sind drei Versuchsreihen mit unterschiedlichen Verfahren durchgeführt worden.

a) Luft aus dem Plastiksack erhielt beim Durchlaufen des Kryomaten eine bestimmte Wasserdampfspannung und wurde dann von zwei Pumpen angesaugt. Luftstrom 1 floß wieder direkt in Küvette 1. Luftstrom 2 (Nebenschluß in Stellung 1) wurde an den Trockenturm gebracht und dort wie früher beschrieben geteilt. Der Anteil der feuchten Luft betrug dabei immer 0,68 l/min, der der trockenen 0,32 l/min. Beide Anteile wurden gemischt und in Küvette 2 geführt. Im vorliegenden Temperaturbereich gilt Wasserdampf annähernd als ideales Gas. Der Dampfdruck dieses Gemisches (p_2) ergibt sich also aus seinem Volumen $V_2=1,00$ l/min, dem Volumen V_1 des feuchten Anteils und dessen Dampfdruck p_1 :

$$p_2 = \frac{p_1 \times V_1}{V_2} \quad \text{oder} \quad p_2 = p_1 \times 0,68 \quad (V_2=1,00 \text{ l/min}).$$

p_1 ist gleichzeitig der Dampfdruck in Küvette 1 und bei bekannter Temperatur des Kühlwassers im Kryomaten aus einer Tabelle zu entnehmen. Die Dampfdruckdifferenz p , die der Linienschreiber anzeigen soll, ist dann $p_1 - p_2$.

b) Bei diesem Verfahren wurde auf die Verzweigungsschaltung und den Trockenturm verzichtet, um jede Möglichkeit von Wasserdampfeintritt auszuschließen. Luftstrom 2 floß vom Kryomaten direkt in Küvette 2. Der höhere Wasserdampfgehalt in Küvette 1 wurde mit einer Kupferschlange, Tropfflasche und Watteflasche

erzeugt, die im Wasserbehälter eines Thermostaten standen. Zu jeder eingestellten Feuchtigkeit in Küvette 2 wurde diejenige des anderen Luftstromes mehrfach geändert. Die Auswertung dieser Ergebnisse sollte zeigen, ob der Ausschlag in jedem Meßbereich, abgesehen von seiner absoluten Größe, unabhängig von der Dampfdruckdifferenz ist; d.h. ob z.B. eine Verdoppelung dieser Differenz durch einen doppelt so großen Ausschlag angezeigt wird.

- c) Mit den angegebenen Versuchen ließ sich der Dampfdruck nur bis etwa 4 mm Hg erniedrigen. Für den fehlenden Bereich und zur Überprüfung der ersten Ergebnisse wurde ein drittes, von P r a t z e l entwickeltes Verfahren angewandt.

In einem Wasserbad mit einer Temperatur von 20° C standen Erlenmeyer-Kolben mit wässrigen Schwefelsäurelösungen verschiedener Konzentration. Der geringste, sich über der Lösung einstellende Sättigungswasserdampfdruck betrug 0,6 mm Hg. Aus einer Öffnung im Verschluß des Kolbens wurde die Luft von einer Pumpe angesaugt, dann in eine der Küvetten und aus ihr durch eine zweite Öffnung im Verschluß wieder in den Kolben geblasen. Wegen der geringen Dampfdrücke und der hieraus sich ergebenden großen Dampfdruckdifferenzen gegen Zimmerluft wurde hier der geschlossene Kreislauf vorgezogen. Die PVC-

Schläuche zur Pumpe und zum Küvettenausgang wurden dann jeweils an die zwei Kolben geschlossen, deren Wasserdampfkonzentrationen miteinander kombiniert werden sollten. In einem mehrere Stunden dauernden Versuch stellte Pratzel außerdem fest, daß auch bei sehr geringen Konzentrationen der bleibende Wert am Linienschreiber spätestens nach 10 Minuten erreicht ist.

Für die Auswertung dieser Versuche wurde das Verhältnis des Ausschlages A zur Dampfdruckdifferenz p als Empfindlichkeit E festgelegt:

$$E = \frac{A}{p} \quad (\text{Skalenteile/Torr})$$

Es fand sich, daß E mit kleiner werdendem Dampfdruck in Küvette 2, der Küvette mit dem kleineren Wasserdampfgehalt, anwächst. E ist dagegen im geprüften Dampfdruckbereich nicht merklich von der Dampfdruckdifferenz zwischen den beiden Küvetten abhängig. Das würde bedeuten, daß die Empfindlichkeit allein vom Dampfdruck in Küvette 2 abhängt, ohne Einfluß bleibt dagegen die Konzentration in Küvette 1. Daß die Empfindlichkeit mit kleiner werdendem Dampfdruck zunimmt, läßt sich im Prinzip mit dem Lambert-Beer'schen Gesetz erklären:

$$I = I_0 \times e^{-d \times c}$$

Die Intensität I, mit der der Infrarotstrahl aus dem Gas austritt, ist also bei gegebener Schichtdicke d =

Küvettenlänge umso größer, je kleiner die Konzentration des Meßgases ist. Diese Strahlungsenergie wird, wie berichtet, in Druck- und Temperaturschwankungen umgewandelt und auf eine gespannte Metallmembran übertragen. Daraus folgt, daß die geringere Konzentration in Küvette 2 die größere Druckschwankung im Empfänger erzeugt. Damit ist das Ansteigen der Empfindlichkeit mit sinkender Meßgaskonzentration zu erklären. Ihre Unabhängigkeit vom Dampfdruck der ersten Küvette liegt vielleicht an den mechanischen Eigenschaften der Metallmembran. Dieser Umstand garantiert aber die unverzerrte Wiedergabe der Dampfdruckdifferenzen zwischen beiden Küvetten in einem Meß- bzw. Empfindlichkeitsbereich, so daß kleinere Schwankungen in der HWA im richtigen Verhältnis zum Ausgangswert wiedergegeben werden.

Trägt man nun das Verhältnis $E = \frac{A}{p}$ in Abhängigkeit von p_2 , dem Dampfdruck in Küvette 2, auf doppelt logarithmisches Papier auf, so erhält man eine Gerade mit negativer Steigung. Die Empfindlichkeit E ist damit eine Potenzfunktion vom Dampfdruck p_2 in Küvette 2.

$$E = k \times p_2^{-\alpha}$$

α ergibt sich aus der Steigung der Geraden. Die Werte bewegen sich zwischen 0,51₈ und 0,62₉, wobei letzterer ein Extremwert ist. Die meisten der errechneten Werte

bewegten sich um 0,52. k erhielt man aus den E-Größen der Versuche und dem Werte für die Steigung zu 3,33 bis 4,3. Untersucht wurde der Bereich von 0 bis 15 mm Hg. Dabei zeigte die letzte Methode, daß sich die Empfindlichkeit unterhalb eines Dampfdruckes von 4 mm Hg nicht mehr wesentlich ändert. Das Ergebnis war aber nicht ganz eindeutig, deshalb wurden die Versuche am Menschen in diesem Bereich nicht ausgewertet. Es zeigte sich außerdem, daß die Dampfdruckdifferenz nur bis zu einer bestimmten Größe, die je nach Empfindlichkeitsbereich verschieden ist, durch proportionale Ausschläge wiedergegeben wird. Die Proportionalitätsgrenze lag aber außerhalb des physiologischen Bereiches, wenn die Versuchsperson nicht stärker schwitzte.

6.) Auswertung

Zur Auswertung der Versuche über die Hautwasserabgabe wurde die oben erläuterte Beziehung $E = k \times p_2^{-d}$ (Skalenteile Ausschlag / mm Hg Dampfdruckdifferenz) in ein Nomogramm aufgetragen (s.S.20). Bekannt sind der Ausschlag A in Skalenteilen und p_2 (mm Hg), der Wasserdampfgehalt der Luft, die über die Haut streicht. p_2 befindet sich gleichzeitig in Küvette 2 und bestimmt somit die Empfindlichkeit. Da $k \times p_2^{-d} = \frac{A}{p}$, kann mit den bekannten Größen a und p_2 der Wert von p dem Nomogramm entnommen werden, und man hat hiermit

Nomogramm

p_2 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1
5 10 15 mmHg

$$E = k \cdot p_2^{-\lambda}$$

Beispiel:
Luftdruck: $p_2 = 5 \text{ mmHg}$; Ausschlag am Linienschreiber: $A = 2$ Skalenteile; — — — → Hautwassertiefe $p = 4 \text{ mmHg}$

Skalenteile
1
0.5

die von der Hautwasserabgabe verursachte Dampfdruck-
zunahme der Luft einer bestimmten Feuchtigkeit.

Um diesen in mm Hg gemessenen Wasserdampfdruck in ge-
bräuchlicheren Größen angeben zu können, wurden fol-
gende Berechnungen ausgeführt:

Gegeben sind:

Dampfdruckdifferenz	p	(mm Hg)
Umrechnungskonstante von Dampfdruck in absolute Feuchtigkeit	$K_{(20^{\circ} \text{ C})} = 0,985 \text{ (g/m}^3 \text{ x mm Hg)}$	
Luftvolumen, das über die Hautfläche streicht	$V = q \times t$	(l)
Luftstromgeschwindigkeit	$q = V/t$ $q = 30$ oder $q = 0,03$	(l/h) (m ³ /h)
Größe der Hautfläche	$F = 38$	(cm ²)

Es gilt:

Für die absolute Feuchtigkeitszunahme in der
Meßkammer $a = K_{(20^{\circ} \text{ C})} \times p$ (g/m³)

Für die Wassermenge im Luftvolumen 1 m³
 $W = a \times V$ (g)

Für die Wassermenge, die in einer Stunde von 1 cm²
der 38 cm² großen Hautfläche abgegeben wurde

$$\begin{aligned}
 W &= a \times V \times 1/38 \\
 &= p \times K \times V \times 1/38 \\
 &= p \times 0,985 \times 0,03 \times 1/38 \\
 &= p \times 0,777 \times 10^{-3} \quad (\text{g/h x cm}^2) \\
 W &= p \times 0,777 \quad (\text{mg/h x cm}^2)
 \end{aligned}$$

=====

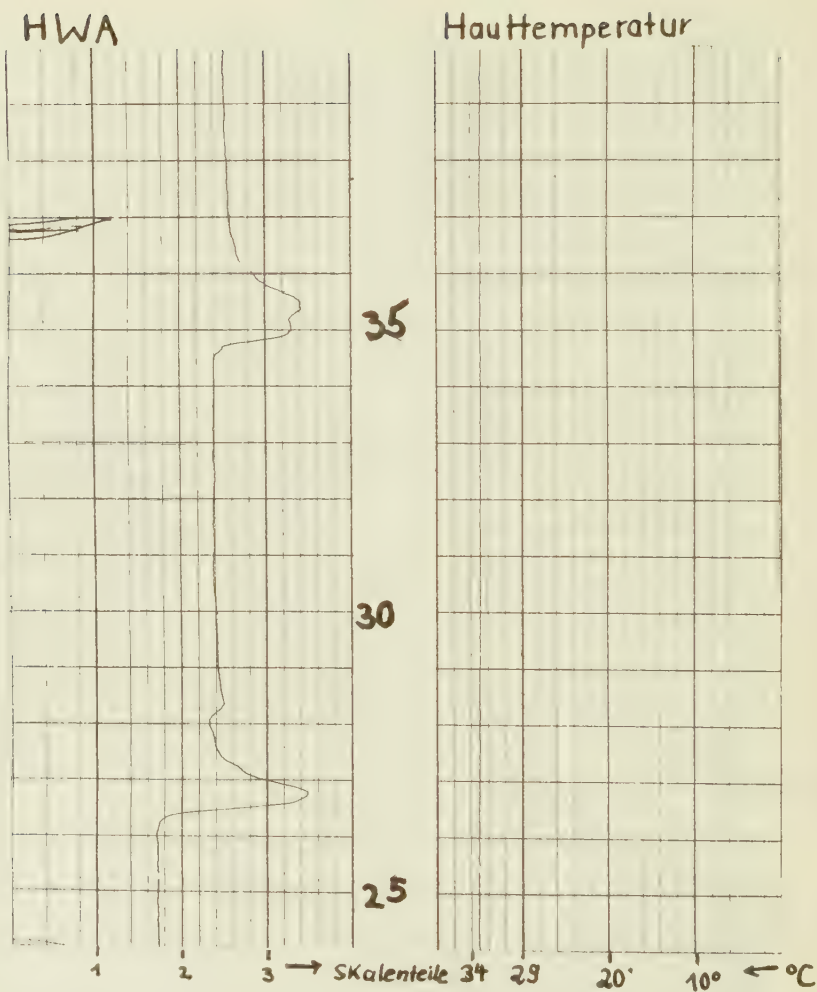


Abb.2 Teil eines Registrierstreifens vom Linien-schreiber, Ausschnitt eines Versuches mit Trockenturm.

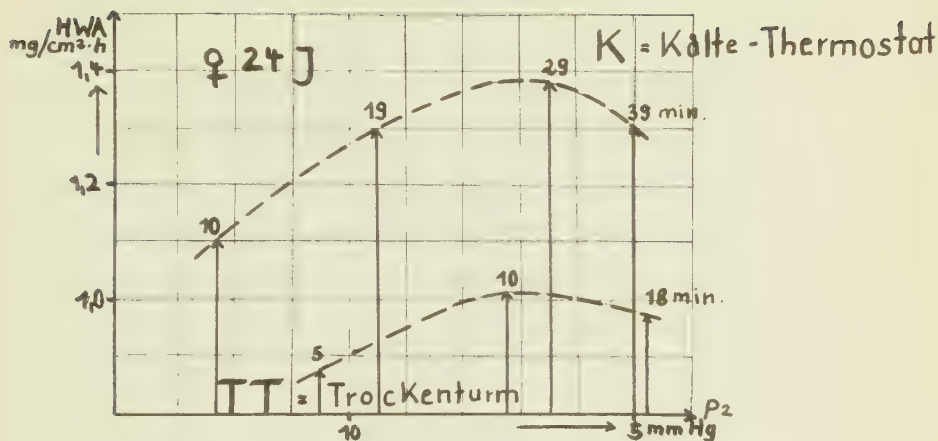


Abb.3 Hautwasserabgabe (HWA) in Abhängigkeit vom Dampfdruck (p_2). Je ein Versuch mit Kälte-Thermostat bzw. Trockenturm. Zahlen über der Kurve geben die Zeit in min an, vom Versuchsbeginn an gerechnet.

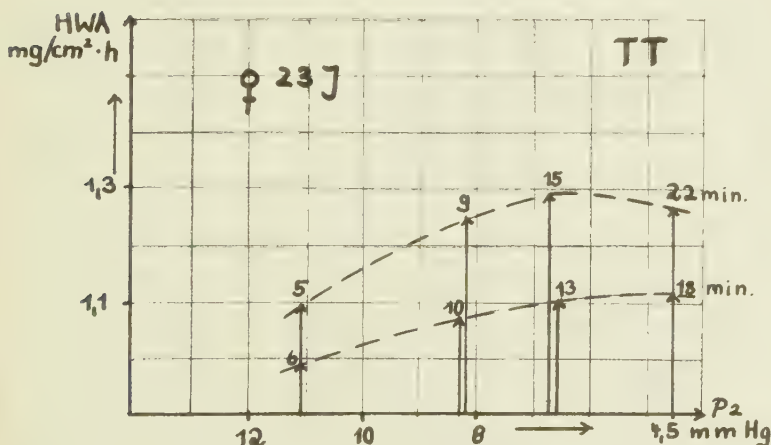


Abb.4 Obere Kurve wie in Abb.3. Die untere Kurve zeigt keine Wiederabnahme der Wasserabgabe bei geringen Dampfdrücken. Versuchsdauer etwa gleich lang.

E.) Ergebnisse

Die folgenden Kurven wurden mit dem Wert $\alpha = 0,518$ für die Steigung der Empfindlichkeitsfunktion des Meßapparates berechnet. Auf die Auswertung mit dem größeren Wert wird später eingegangen werden. Die Messung wurde immer mit Luft normaler Feuchtigkeit begonnen. Erst wenn der Linienschreiber einen konstanten Wert für die HWA anzeigte (Abb.2), wurde der nächst tiefere Feuchtigkeitsgrad eingestellt, ohne daß die Kammer inzwischen von der Haut entfernt worden wäre. Insgesamt wurden 50 Versuche gemacht.

Trägt man den Wasserverlust durch die Haut in $\text{mg/cm}^2 \times h$ in Abhängigkeit von dem Dampfdruck der Luft (Torr) in ein Diagramm ein, so erhält man ähnliche Kurven, wie sie in Abb.3 an zwei Versuchen mit einer Person dargestellt sind. Da vermutet wurde, daß die Versuchsdauer für die Krümmung der Kurven mit von Bedeutung sein könnte, wurde sie mit eingezeichnet. Es fällt auf, daß die HWA mit abnehmender Feuchtigkeit zunächst steigt und von einem bestimmten Punkt an wieder abfällt. Keineswegs immer kam es jedoch zu einem wirklichen Absinken des HWA nach vorausgegangenem Anstieg, auch wenn man den Bereich unter 4 Torr wegen der Unsicherheit der Ergebnisse nicht berücksichtigt. Oft erhielt man nur eine Krümmung der Kurve ohne Wendepunkt wie im Beispiel der

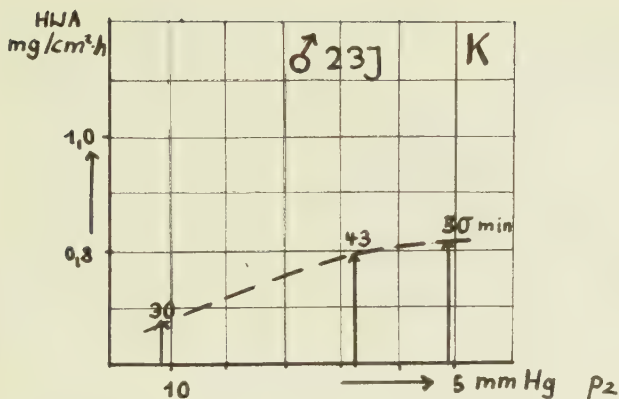


Abb.5 Relativ lange Versuchsdauer, aber keine Abnahme der HWA im untersuchten Bereich.

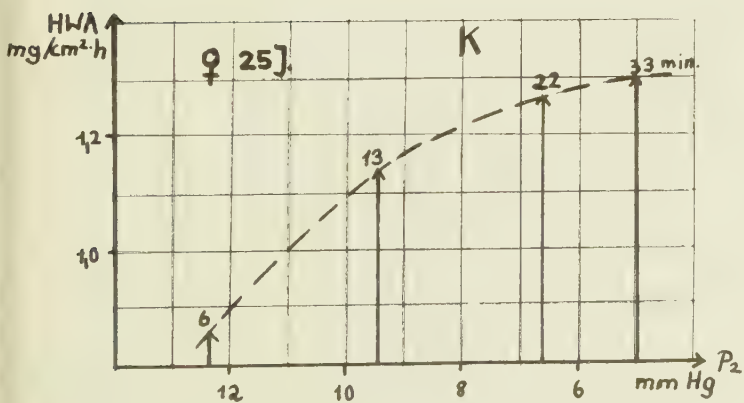


Abb.6 Kein Absinken der HWA trotz anfänglich starker Zunahme bei Verringern des Dampfdruckes (p_2)

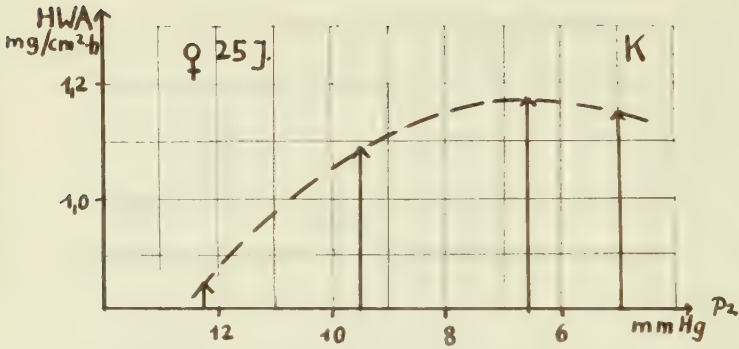


Abb.7 Versuch der Abb.6, ausgewertet mit dem größeren Exponenten in der Empfindlichkeitsgleichung des Meßapparates $E = k \times p_2^{-\alpha}$ (s.S.18)

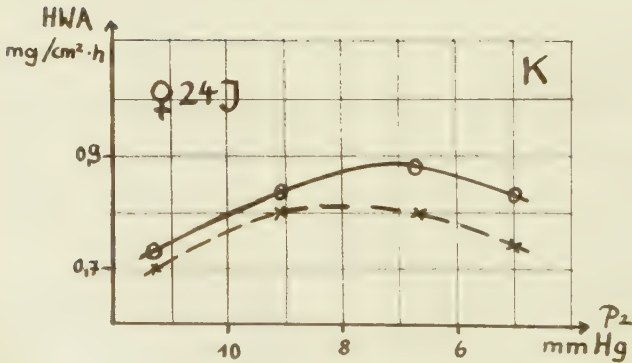


Abb.8 Auswertung eines Versuches mit $\alpha = 0,518$ ——— und mit $\alpha = 0,653$. — — —

Abb.4. Zum Vergleich ist ein zweiter Versuch mit derselben Person eingezeichnet, bei dem die Wasserabgabe wieder vermindert wurde. Bei zwei von den insgesamt sechs Versuchspersonen sank die HWA über einer Luftfeuchtigkeit von 4 Torr nie ab (Abb.5, 6). Irgendwelche Zusammenhänge zwischen Alter, Geschlecht und Hautbeschaffenheit waren nicht erkennbar.

Wertet man die Versuche unter Berücksichtigung der Unsicherheit im Eichverfahren mit $\alpha = 0,65_3$ in Gleichung $E = k \times p_2^{-\alpha}$ (S.18) aus, nimmt auch die HWA der Versuchsperson von Abb.6 bei etwa 5 Torr wieder ab (Abb.7). Bei den anderen Versuchspersonen ändert sich bei großen Exponenten wohl die Höhe der HWA, nicht aber der Charakter der Kurven. Abb.8 zeigt Darstellungen desselben Versuches mit beiden Auswertungen. Wie auf S.18 ausgeführt war, stellt dieses α jedoch einen Extremwert dar. Deshalb wurde weiterhin mit dem Mittelwert $\alpha = 0,5$ gerechnet.

In einer zweiten Versuchsreihe ist nach Erreichen des tiefsten Dampfdruckes die Feuchtigkeit entweder stufenweise heraufgesetzt oder die Umgebungsluft sofort über die Haut geleitet worden. In einigen Fällen erhielt man die gleiche Wasserdampfabgabe wie auf dem Kurvenast für abnehmende Luftfeuchte (Abb.9). Hatte sich jedoch inzwischen die Hauttemperatur geändert, so erhielt man bei derselben Luftfeuchtigkeit einen von der ersten Messung sehr abweichenden Wert.

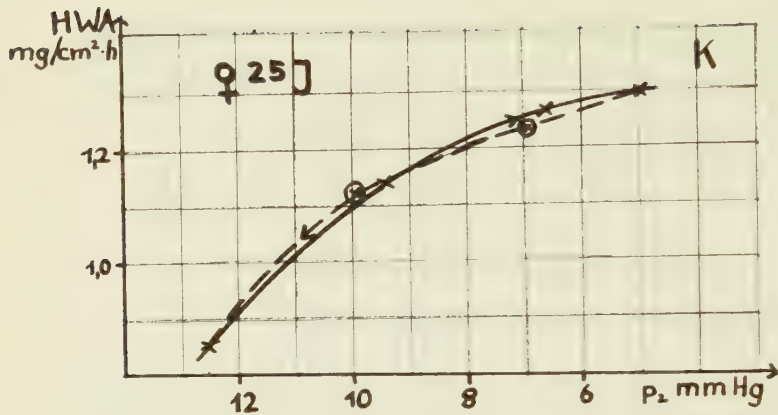


Abb. 9 Wasserabgabe bei Senken ————— und bei Erhöhen - - - - - der Luftfeuchtigkeit (p_2).

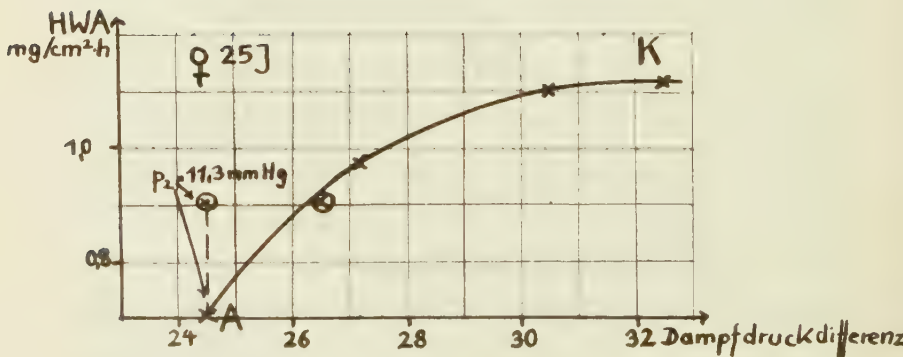


Abb. 10 Wasserabgabe in Abhängigkeit von der Differenz zwischen Dampfdruck der Luft und dem der Haut. Gleiche Luftfeuchtigkeit bei Punkt A und $\otimes$. Unter Berücksichtigung der veränderten Hauttemperatur rückt Punkt $\otimes$ in den Kurvenbereich.

Nach Büttner hat die intra- oder subdermale Flüssigkeit an der Wasserdampf-Barriere (s.o.) eine Konzentration von 4 Osmolar. Das bedeutet eine relative Feuchte (rF) von ungefähr 90%. Den Dampfdruck in Torr erhält man dann aus der gemessenen Oberflächentemperatur und dem aus Tabellen entnommenen Sättigungsdampfdruck des Wassers bei dieser Temperatur.

Subtrahiert man von 90% des oben genannten Sättigungsdruckes den Dampfdruck der gerade über die Haut strömenden Luft, so ergibt sich die für die Diffusion entscheidende Dampfdruckdifferenz. Setzt man nun die HWA zu dieser Differenz in Beziehung, so zeigt sie bei absinkender und ansteigender Feuchtigkeit weit bessere Übereinstimmung.

Abb.10 zeigt einen Versuch, bei dem nach dem Zurückschalten auf die Ausgangsfeuchtigkeit eine wesentlich höhere HWA gemessen wurde. Berücksichtigt man mit der Dampfdruckdifferenz die inzwischen erhöhte Hauttemperatur, so fällt der Wert etwa in die Kurve.

In einem anderen Versuch (Abb.11) war die Hauttemperatur um $0,6^{\circ}$ gesunken. Entsprechend waren auch HWA und Dampfdruckdifferenz geringer. Verlängert man die für sinkende Feuchtigkeit gewonnene Kurve in den Bereich geringerer Dampfdruckdifferenz, so liegt der Punkt bei gesunkener Hauttemperatur auf dieser Linie.

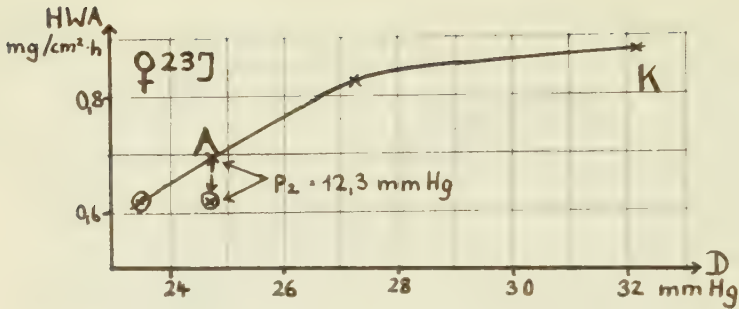


Abb.11 HWA in Abhängigkeit der Dampfdruckdifferenz (D). A und ⊗, Meßpunkte bei gleicher Luftfeuchtigkeit. Bei Einbeziehung der erniedrigten Hauttemperatur fällt der Punkt ⊗ in die willkürlich verlängerte Kurve.

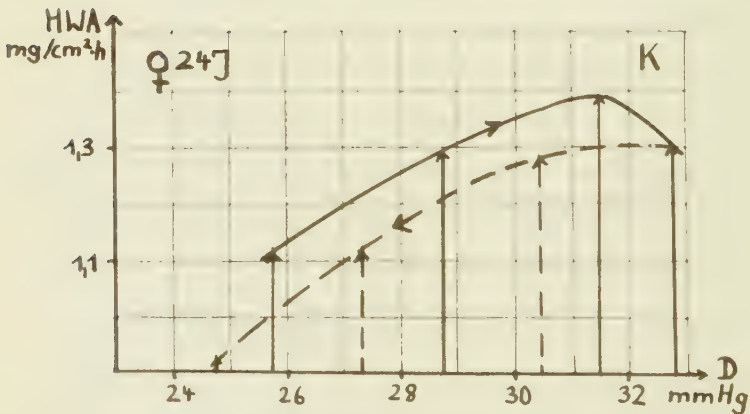


Abb.12 Keine Deckung der Kurve bei sinkender ——— mit der bei steigender Luftfeuchtigkeit. — — — —

Die Ergebnisse waren jedoch nicht in jedem Fall so gut. In Abb. 12 decken sich die Kurven für die Messungen bei sinkender und steigender Feuchtigkeit nicht. Hierbei ist auch bemerkenswert, daß nach dem Umschalten auf höhere Dampfdrucke nicht auch erst wieder ein Anstieg der HWA und dann erst ein Abfall erfolgt, wie man dies nach dem Kurvenverlauf bei abnehmender Feuchtigkeit erwarten könnte. Das war allgemein der Fall, wenn man die Feuchtigkeit kontinuierlich heraufsetzte, nachdem die Wasserabgabe bei noch sinkender Feuchtigkeit abgenommen hatte.

Wie auf S.⁵ erklärt wurde, ist die Barrierenfunktion ausgedrückt durch ihren Diffusionswiderstand R ($\text{mm Hg} \times \text{cm}^2 \times \text{h} / \text{mg}$). Man erhält ihn, indem man die Dampfdruckdifferenz D durch die gemessene Wasserabgabe teilt. Den reziproken Wert nannte Büttner (11) die Wasserdurchgangszahl λ ($\text{mg}/\text{cm}^2 \times \text{h} \times \text{mm Hg}$). Vorausgesetzt, daß alle anderen Faktoren, die die Diffusion beeinflussen, unverändert bleiben, sollte man bei einem rein physikalischen Vorgang einen konstanten Wert erhalten. Untersucht man die Versuche daraufhin und trägt R als Funktion des Dampfdruckes der Luft in ein Diagramm auf, so erhält man Kurven, wie sie in Abb. 13 eingezeichnet sind.

Für diese Diagramme wurden nur Versuche genommen, bei denen sich die Hauttemperatur höchstens um $1/10^\circ$

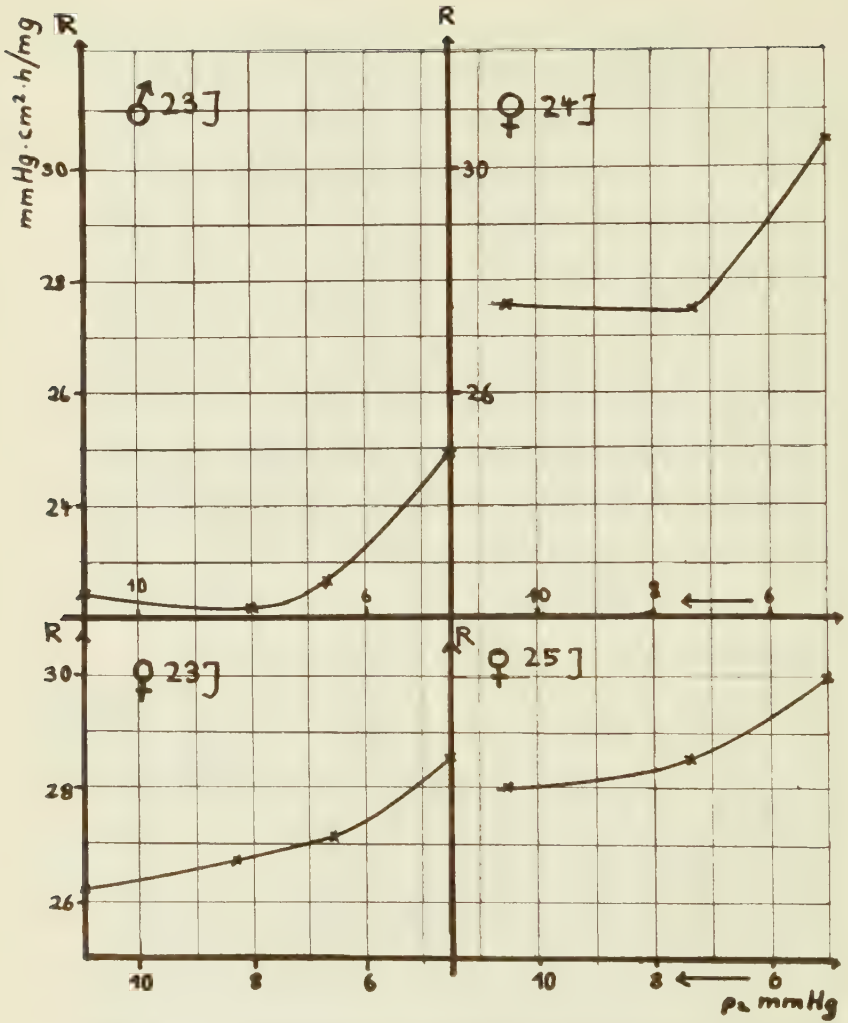


Abb.13 Verhalten des Diffusionswiderstandes (R) bei Vermindern der Luftfeuchtigkeit (p_2), 4 Versuchsbeispiele.

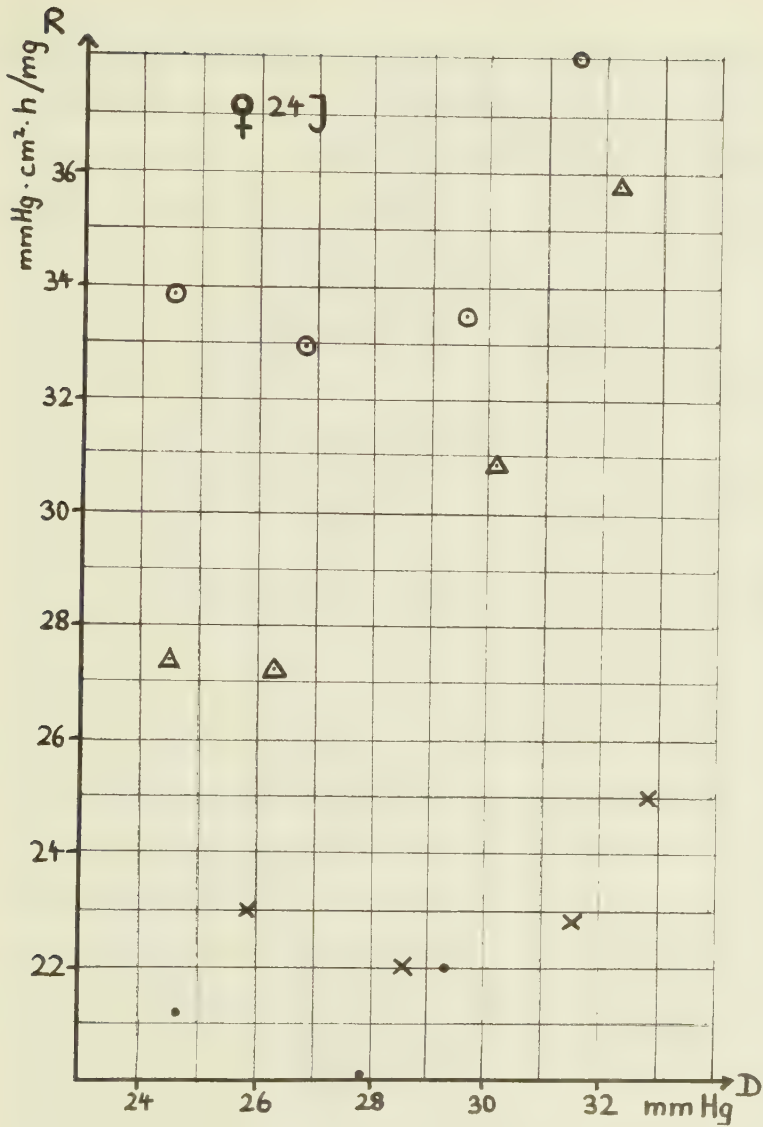


Abb.14 Diffusionswiderstand (R) in Abhängigkeit von der Dampfdruckdifferenz (D). Zu einem Versuch gehörende Punkte am gleichen Zeichen kenntlich (z.B. $\times$)

geändert hatte. Dann hängt die Dampfdruckdifferenz nur vom Dampfdruck der Luft ab, und man erhält das gleiche Kurvenbild, wenn man R nur zu diesem in Beziehung setzt. Aus den Kurven ist zu ersehen, daß beide Größen anfangs annähernd konstant bleiben. Bei geringen Feuchtigkeiten der Luft steigt jedoch der Widerstand an, und gleichzeitig nimmt die Wasserdurchgangszahl ab.

In Abb. 14 sind von allen Messungen an einer Versuchsperson die Diffusionswiderstände in Abhängigkeit der Dampfdruckdifferenz aufgezeichnet. Die große Streubreite läßt keinen sicheren Zusammenhang mit der Dampfdruckdifferenz erkennen.

Betrachtet man jedoch die Widerstände nach Versuchen geordnet, zusammengehörende Punkte am gleichen Zeichen kenntlich, so ergibt sich wieder eine Zunahme bei geringen Luftfeuchtigkeiten oder großen Dampfdruckdifferenzen. Wegen der großen Schwankungen der Wasserabgabe einer einzelnen Person schon innerhalb von Stunden erscheint es deshalb nicht zweckmäßig, einen Mittelwert aus einer sich über Wochen und Monate hinziehenden Versuchsreihe zu bilden.

F.) Diskussion

Das auffälligste Merkmal der Kurven, welche die Abhängigkeit der Wasserverdunstung durch die menschliche

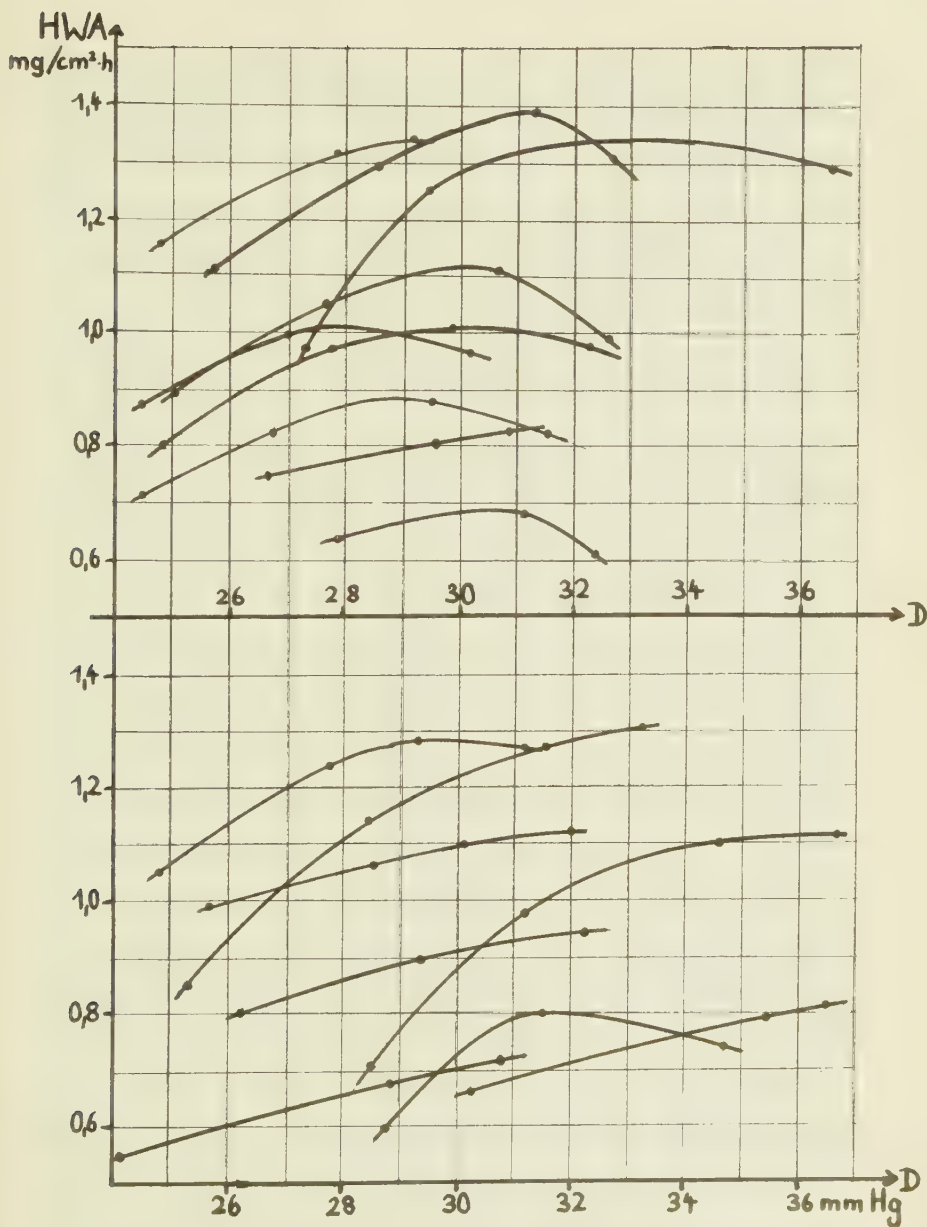


Abb. 15 Auswahl von Versuchen der 6 Versuchspersonen.
HWA in Abhängigkeit der Dampfdruckdifferenz D

Haut von der Luftfeuchtigkeit beschreiben, ist die Krümmung unterhalb eines Dampfdruckes von durchschnittlich 6 mm Hg. Im Bereich höherer Feuchtigkeiten könnte man die Kurven noch als annähernd linear bezeichnen. Entsprechend bleiben hier Diffusionswiderstand oder Wasserdurchgangszahl auch etwa konstant. Diese Konstanz würde der Forderung nach einem reinen Diffusionsprozeß ohne zusätzliche regulatorische Mechanismen oder feuchtigkeitsabhängige Änderungen der Hautdurchlässigkeit gerecht. Sie entspräche Eigenschaften der Haut wie einer unveränderlichen toten Membran. Der höchste gemessene Dampfdruck betrug allerdings nur 14 mm Hg, so daß nichts Sicheres über den Verlauf bei höheren Luftfeuchtigkeiten ausgesagt werden kann.

Wie oben ausgeführt, begrenzte die Versuchsanordnung den Meßbereich insofern, als zum Befeuchten der Luft ein höherer Druck, den die Pumpe nicht erreichte, erforderlich gewesen wäre und als bei Luftfeuchtigkeiten, die über dem Sättigungsdruck der Temperatur der umgebenden Luft lagen, Wasser im Schlauchsystem auskondensierte.

Nicht mehr vereinbar mit einem unbeeinflussten Diffusionsvorgang ist das Verhalten der Hautwasserabgabe bei niederen relativen Feuchten, dargestellt durch eine eindeutige Krümmung der Kurven. Das heißt, daß

die Zunahme der Wasserverdunstung pro mm Hg Dampfdruckabnahme in der umgebenden Luft immer geringer wird.

Es erhebt sich nun die Frage nach der Ursache dieser Erscheinung. Zur Diskussion standen schon bei früheren Untersuchungen aus anderen Gründen:

1. Unterschiede in der insensibel bleibenden Schweißdrüsensekretion,
2. eine Änderung des Diffusionswiderstandes der Haut und daraus resultierend eine Veränderung des Wasserdurchgangs.

1.) Unterschiede in der insensiblen Schweißdrüsensekretion

Die erheblichen Differenzen in der Wasserabgabe einer einzelnen Versuchsperson, wie sie auch hier wieder demonstriert werden, erklärt Rothmann (25), wie auch Heerd (14) und andere, mit Schwankungen dieser "Ruhe"-Sekretion der Schweißdrüsen. Nach Ergebnissen von Angele (1) beträgt das Verhältnis dieses Anteils zur reinen perspiratio insensibilis unter normalen Bedingungen am Unterarm 1 : 13 und ist somit ziemlich gering. Wenn die Kurvenform durch eine Änderung in dieser Schweißdrüsensekretion zustande gekommen wäre, dann würde das bedeuten, daß diese in fast trockener Umgebung zurückgeht. Aber auch wenn man annimmt, daß die Sekretion gänzlich aufhört, würde ihre Menge in vielen Fällen nicht ausreichen, um den

Rückgang der Verdunstung in vollem Umfang zu erklären.

Eine Änderung der Schweißdrüsensekretion mit der relativen Feuchte erscheint aber auch vor allem deshalb unwahrscheinlich, weil das Schwitzen zur Konstanterhaltung der Körperkerntemperatur in den Dienst der Thermoregulation des ganzen Körpers gestellt ist. Die wichtigsten Temperaturfühler befinden sich im Zwischenhirn, wo sich auch das Kühlzentrum befindet. So kann es beispielsweise dazu kommen, daß die Haut nach dem Skifahren in Ruhe noch schwitzt, obwohl man friert, weil die Temperatur im Zwischenhirn noch hoch ist. Eine makroskopisch sichtbare Schweißproduktion setzt aber unter mittleren Luftfeuchte- und Windverhältnissen erst bei einer Umgebungstemperatur von 29° C ein, bei der die Wärmeabgabe durch Leitung und Strahlung ungenügend wird. Es ist anzunehmen, daß auch die im Indifferenzbereich stattfindende unsichtbare Schweißsekretion der Regulation desselben Zentrums unterliegt. So ließe sich bei Lütcke, Klusmann und Kaufmann die Übereinstimmung der Haut-Wasserabgabe mit der Rektaltemperatur erklären. Bei einer Erhöhung der Rektaltemperatur als Zeichen einer Änderung der Kerntemperatur stieg auch die Wasserabgabe der Haut. Bei den oben beschriebenen Versuchen wurde zwar die Rektaltemperatur nicht gemessen, aber es ist nicht

anzunehmen, daß sie sich in der relativ kurzen Versuchsdauer verändert hat. Außerdem werden sich die Temperaturverhältnisse des ganzen Körpers kaum ändern, wenn nur eine kleine Hautstelle veränderten Bedingungen ausgesetzt ist.

2.) Änderung des Diffusionswiderstandes

Büttner gibt für trockene Bedingungen gegenüber feuchten einen drei- bis viermal so hohen Widerstand an. Bei den oben beschriebenen Versuchen betrug die Widerstandszunahme bei niedrigen Feuchtigkeiten zwar im Durchschnitt nur 10%, ist aber offensichtlich. Heerd und Ohara dagegen erhielten keinen Zusammenhang zwischen relativer Feuchte und Diffusionswiderstand der Haut. Wie schon erwähnt, arbeiteten sie mit nichtventilierten Kapseln. Bekannt ist, daß hohe Windgeschwindigkeit den Wasserverlust begünstigt, was durch den Abbau der ruhenden Luftschicht auf der Haut zustandekommt. Diese Störung der gewöhnlichen klimatischen Verhältnisse stellt auch einen wesentlichen Punkt der Kritik Heerds an der Methode mit ventilierten Kapseln dar.

Dazu möchte ich sagen, daß die Geschwindigkeit des Luftstroms von 0,5 l / min im zuführenden

Schlauchsystem mit einem Querschnitt von ungefähr $0,5 \text{ cm}^2$ in der Kapsel mit ihrem viel größeren Querschnitt so verringert wird, daß sie sicher nicht der Stärke eines Sturmwindes gleicht. Aber mit dem teilweisen Abbau der ruhenden Grenzschicht ist ein zusätzlicher Widerstand ausgeschaltet.

Denkt man sich nun den Widerstand der Barriere (R_1) und den der Luftschicht (R_2) wie in einem elektrischen Stromkreis hintereinander geschaltet, dann ist $R_1 + R_2 = R$. Veränderungen im Barrierenwiderstand würden sich umso weniger bemerkbar machen, je geringer diese sind und je dicker die Luftschicht ist. Bei Heerd war der Abstand der Wägeschale mit dem Absorptionsmittel von der Haut noch größer als die Dicke der ruhenden Luftschicht. Es wäre deshalb nicht unmöglich, daß Änderungen des Widerstandes, wie sie in Abb. 13 aufgezeichnet sind, bei Heerd unbemerkt bleiben.

Die erschwerte Diffusion könnte auf der anderen Seite die Erklärung dafür sein, daß Heerd bei derselben Feuchtigkeitsdifferenz keine so große Zunahme der Wasserverdunstung erhielt und daß die HWA auch insgesamt um durchschnittlich $0,25 \text{ mg/cm}^2 \times \text{h}$ unter den hier angegebenen Werten lag.

Außer von dem Wasser, das von der insensiblen Schweißdrüsensekretion herrührt, wird die Diffusion hauptsächlich von einem Fluß gespeist, der auch noch vorhanden ist,

wenn man die Schweißdrüsentätigkeit z.B. durch Agari-
cin unterbindet. Diese Flüssigkeit wird von den tiefer
gelegenen Schichten der Epidermis kontinuierlich ange-
liefert. Diejenige Menge, welche schließlich das stra-
tum corneum erreicht, wird von der Barriere begrenzt.
Eine prinzipielle Möglichkeit für die Zunahme des Dif-
fusionswiderstandes wäre die, daß der Wassernachschub
bei geringen relativen Feuchten reduziert würde, etwa
durch einen neurogenen Steuerungsvorgang unterhalb
der Barriere. Darüber ist aber nichts bekannt, und
das ist auch sehr unwahrscheinlich. Ebenso ist auch
die Abhängigkeit der Verdunstung von der Durchblutung
nicht evident. Bei gedrosselter Zufuhr gibt die Haut
immer noch genügend Wasser ab.

Ein Versuch Büttners (11) demonstriert nun, daß der
Wassergehalt der Hornschicht nicht nur für ihre phy-
sikalischen Eigenschaften, sondern auch für ihre Was-
serdurchlässigkeit eine Rolle spielt. Er hatte ein
stratum conjunctum für einen Tag einer relativen
Feuchte von 90% ausgesetzt. Danach erniedrigte er
die Feuchtigkeit wieder kontinuierlich. Es zeigte
sich dann, daß der Wasserdampfdurchtritt bis hinun-
ter zu ganz geringen Feuchtigkeiten etwa gleich blieb.
Bei nicht so behandelter Haut erhielt er in feuchter
Luft einen vier bis fünf mal höheren Durchtritt als
in trockener.

a) Wassergehalt des stratum corneum

Da während meiner Versuche die Luftfeuchtigkeit systematisch geändert wurde, ist auch an eine Veränderung des Hautwassergehaltes zu denken. Während einer gewissen Übergangszeit addiert und subtrahiert sich daher die Wasserentspeicherung beziehungsweise -speicherung zur Wasserdampfabgabe nach außen. Eine Abschätzung der möglichen Einflußnahme auf die Versuchsergebnisse ergibt folgendes Bild:

Der Wassergehalt der Hornschicht ist immer individuellen und zeitlichen Schwankungen unterworfen. Es sei nur daran erinnert, daß man im Winter leichter rissige Hände bekommt als im Sommer mit seiner höheren Temperatur und höheren relativen Feuchte. Die Hornschicht besteht aus 10 bis 15 Zellen, wobei eine Zelle $0,12 \times 10^{-3}$ bis 2×10^{-3} mm dick ist. Die Barriere hat 4 bis 10 Zellen, eine ist $0,12 \times 10^{-3}$ bis $0,9 \times 10^{-3}$ mm dick. Nimmt man die Dichte mit 1 mg/mm^3 an, so erhält man für 1 cm^2 ein Gewicht von 0,17 bis 3 mg. Der Wassergehalt beträgt ungefähr 10%, bei dieser Menge soll die Hornschicht weich und elastisch bleiben (6). Damit käme man auf einen Wassergehalt von 0,017 - 0,3 mg in der Haut bis zur Barriere bei einer Oberfläche von 1 cm^2 .

Wenn das Wasser in der Hornschicht zur Verdunstung mit herangezogen wird, so müßte sich die Grenze

naß/trocken nach innen, eventuell innerhalb die Barriere verschieben. Eine Abnahme des Wasserdepots sollte umso deutlicher werden, je länger ein Versuch dauert.

Unterschiede in der Versuchsdauer ergaben sich rein methodisch, da man mit dem Kältethermostaten eine wesentlich längere Zeit benötigt, um die Luft geringerer Feuchtigkeit zu erzeugen, als mit dem Trockenturm. Untersucht man die Versuche daraufhin, so spielt die Versuchsdauer zweifellos eine nicht unerhebliche Rolle insofern, als die HWA nach einer langen Zeit immer die Tendenz zeigt abzunehmen. Aber sie allein kann nicht entscheidend sein. Es kam auch nicht selten nach einer relativ kurzen Zeit zu einer stärkeren Krümmung der Kurve, die die Abhängigkeit der Wasserabgabe von der Luftfeuchtigkeit darstellte. Die Diffusion ließ manchmal sogar nach, in einem Fall z.B. dann, wenn die Zunahme der Diffusion bei der Verminderung der relativen Feuchte größer als gewöhnlich war, was in der größeren Steilheit der Kurve zum Ausdruck kommt (Abb.4). Man gewinnt außerdem den Eindruck, daß bei einer von Anfang an geringeren Wasserabgabe auch eine kürzere Zeit genügt, um die Verdunstung wieder absinken zu lassen, als bei einer hohen (Abb.3). Das hängt vielleicht damit zusammen, daß der Wassergehalt der Hornschicht

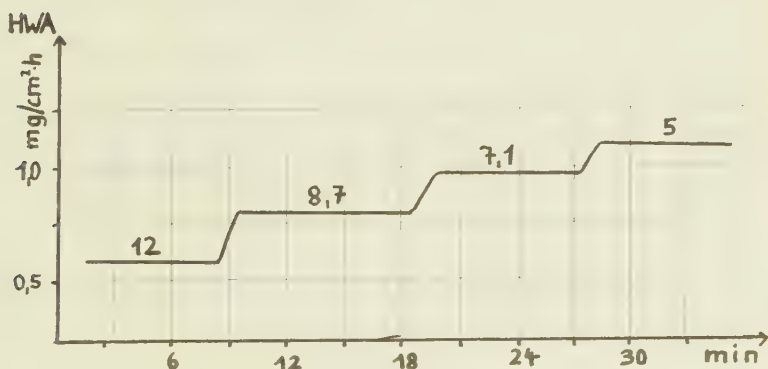
nicht immer gleich groß ist. Da er von dem Fluß durch die Barriere gespeist wird, ist er wahrscheinlich geringer, wenn dieser Fluß klein ist.

Verbindet man nun den Punkt bei der höchsten Feuchtigkeit mit dem bei der tiefsten durch eine Gerade, so müßte sich, wenn die oben angestellten Überlegungen die Kurvenkrümmung erklären sollen, die Differenz zur gekrümmten Kurve mit dem errechneten Wassergehalt des stratum corneum in etwa decken. Um dies zu prüfen, wurde die Fläche unter der Geraden von der unter der gekrümmten Kurve abgezogen. Die Differenz liegt in jedem Fall innerhalb der für den Wassergehalt der Hornschicht angegebenen Menge von 0,017 bis 0,3 mg, jedoch an der unteren Grenze.

In der Tabelle sind zur Demonstration die stärker gekrümmten Kurven angegeben.

Abb. Nr.	abgegebene Wassermenge		Differenz
	unter der gekrümmten Kurve	unter der Geraden	
4 (obere Kurve)	0,5148 mg	0,4753 mg	0,0395 mg
6	0,6073 mg	0,5274 mg	0,0799 mg
8	0,3877 mg	0,3651 mg	0,0226 mg
11	0,5148 mg	0,4933 mg	0,0215 mg
12	0,8285 mg	0,7955 mg	0,033 mg

Diese Zahlen könnten also die Annahme stützen, daß die Krümmung der Kurven durch eine zusätzliche Wasserabgabe der Hornschicht hervorgerufen worden sind. Allerdings würde man dann erwarten, daß die Wasserabgabe auch während der Registrierung bei einer bestimmten Luftfeuchtigkeit abfällt. Dies war jedoch nicht der Fall. (Abb. 3) Berücksichtigt man beim Aufzeichnen der HWA die Ausbildung eines Plateaus bei unveränderter Luftfeuchtigkeit, so erhält man folgendes Bild:



Die Wasserabgabe ist in Abhängigkeit von der Versuchsdauer aufgetragen. Die Zahlen über der Kurve geben den Wasserdampfdruck der Luft in mm Hg an.

Es ist möglich und sogar sehr wahrscheinlich, daß die Verdunstung auch bei Verharren auf einer relativen Feuchte abgenommen hätte, wenn man lange genug gewartet hätte. Dies wurde jedoch nur in

einem Fall getan. Dabei zeigte es sich, daß dann wesentlich mehr Zeit benötigt wird und daß der Wasserverlust bis zum Absinken der HWA insgesamt viel höher ist, als wenn man dazuhin noch die Feuchtigkeit erniedrigt hatte. Diese Beobachtung, wie auch die Konstanz der Wasserabgabe in einer nicht allzu großen Zeitspanne bei unveränderter Luftfeuchtigkeit, deutet aber eher daraufhin, daß die Wasserverarmung der Hornschicht nur ein zusätzliches Moment darstellt. Auch das Ergebnis, daß dieser mögliche Wasserverlust an der unteren Grenze des errechneten Wassergehaltes der Hornschicht liegt, spricht dafür, daß die Abnahme der Wasserverdunstung letztlich also doch in erster Linie auf Veränderungen in der Hautdurchlässigkeit zurückzuführen ist.

Man könnte deshalb die Vermutung äußern, daß die Wasserverarmung Schrumpfungsvorgänge in der Hornschicht auslöst, die noch dazu beitragen, daß der Wasserdurchgang nachläßt. Eine Vorstellung bei Quellungsvorgängen ist die, daß die Zellen sich abrunden und sich dadurch die Spalte zwischen ihnen vergrößern. Bei Austrocknung könnte man dagegen an ein Zusammenrücken der in die Länge gezogenen und an ein Zusammensinken der abgeplatteten Zellschichten denken.

Für eine Strukturänderung durch den Wasserverlust könnte die Tatsache sprechen, daß die Absorptionskraft der Haut für Wasser desto geringer ist, je länger sie in einem trockenen Zustand war (20). Auch die für organische polymere Prozesse typische Hysteresis zeigt sich bei den Kurven, besonders deutlich in Abb. 12. Mit den biologischen Eigenschaften der Haut wären im Gegensatz zu einer toten Membran Strukturänderungen und damit Durchlässigkeitsänderungen gut zu vereinbaren. Aber diese Vorstellung ist natürlich nur eine Theorie, die vorläufig nicht zu beweisen ist.

G.) Zusammenfassung

1. Bei 4 weiblichen und 2 männlichen Versuchspersonen wurde die Hautwasserabgabe an einer 38 cm^2 großen Fläche der Innenseite des linken Unterarmes mit einem Infrarotabsorptionsschreiber gemessen. Ein in der Meßkammer der Haut aufliegendes Thermoelement registrierte laufend die Hauttemperatur. Bei der Auswertung der Ergebnisse wurde sie zur Berechnung der Dampfdruckdifferenz zwischen Luft und Hautinnerem herangezogen. Der Wasserdampfdruck der über die Haut strömenden Luft variierte zwischen 4 und 14 mm Hg.
2. Trägt man die Wasserabgabe in Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit auf, so erhält man mehr oder weniger gekrümmte Kurven, in einigen Fällen sogar ein Absinken der HWA bei geringen Feuchtigkeiten.
3. Eine Abnahme der insensiblen Schweißdrüsensekretion bei niedrigen relativen Feuchten erscheint nicht sehr wahrscheinlich. Diskutiert wird dagegen eine Wasserverarmung der Hornschicht und eine dadurch verursachte Strukturveränderung, die die Durchlässigkeit herabsetzt.

4. In zahlreichen Eichversuchen wurde die Abhängigkeit der Empfindlichkeit des Infrarotabsorptionsschreibers von der Luftfeuchte in der Vergleichsküvette ermittelt.

H.) Literaturverzeichnis

- (1) Angele, K.: Topographische Messung zur insensiblen Hautwasserabgabe und ihre Abhängigkeit von verschiedenen Einflüssen. Med. Diss. aus dem Balneologischen Institut der Univ. München
- (2) Aschoff, J. in Landois - Rosemann, Lehrbuch der Physiologie, 347, (1960)
- (3) Beetz, E.: Die kombinierte qualitative und quantitative Bestimmung der lokalen Hautwasserabgabe. Sdr. aus Arch. f. Physikal. Ther. 4, (1955)
- (4) Beetz, E.: Hautwasserabgabe und periphere Durchblutung. Arch. f. Physikal. Ther. 4, 317, (1955)
- (5) Beronson, G.S. u. Burch, G.E.: Studies of Diffusion of Water Vapour Through Dead Human Skin. The American Journal of Tropical Medicine, 31, 843, (1951)
- (6) Blank, I.H.: Factors Which Influence the Water Content of the Stratum Corneum. Reprinted from the J. of Invest. Dermatology, 18, 6, (1952)
- (7) Blank, I.H.: Further Observations on Factors Which Influence Water Content of the Stratum Corneum. Repr. from the J. of Invest. Dermatology, 21, 4, (1953)
- (8) Blank, I.H.: The Water Content of the Stratum Corneum. III. Effect of Previous Contact With

- Aqueous Solutions of Soap and Detergents. Repr.
from the J. of Invest. Dermatology, 25, 6, (1955)
- (9) Brebner, D.F., Kerslake, D. u. Waddel, I.L.: The
Diffusion of Water Vapour Through the Human Skin.
J. Physiol. Lond. 132, 225-231, (1956)
- (10) Büttner, K.: Diffusion of Water Vapour Through
Human Skin. J. Appl. Physiol. 6, 229-242, (1953)
- (11) Büttner, K.: On the Transfer Funktion of Human Skin.
University of Washington, Department of Metereology
and Climatology, Anual Report (1960)
- (12) Gottron, H.A. u. Schönfeld, W.: Dermatologie und
Venerologie, Band 1/Teil 1, 149, 173-179
- (13) Heerd, E. u. Ohara, K.: Ein Gerät zur ununterbrochenen
Messung der Perspiratio Insensibilis kleiner Haut-
flächen. Pflügers Arch. ges. Physiol. 272, 327-246
(1961)
- (14) Heerd, E. u. Ohara, K.: Untersuchungen über die
Wasserdampfabgabe kleiner Hautflächen beim Menschen.
I. Die Abhängigkeit vom Wasserdampfdruck in der um-
gebenden Luft bei normaler Hauttemperatur. Pflü-
gers Arch. 276, 32-41, (19 62)
- (15) Isherwood, P.: A Modified Cell for the Determina-
tion of Water Diffusion through the Skin.
J. Inv. Derm., 40, 143, (1963)

- (16) Kaufmann, W. u. Lütcke, A.: Zum Mechanismus der Hautwasserabgabe. Arch. f. Physikal. Ther. 5, 394, (1955)
- (17) Kaufmann, W., Lütcke, A. u. Thauer, R.: Diffusion von Wasserdampf durch die Haut des unnarkotisierten Hundes. Sdr. aus Die Naturwissenschaften, 21, 590, (1955)
- (18) Kaufmann, W., Thauer, R. u. Zöllner, G.: Der insensible Gewichtsverlust als Funktion der Umweltbedingungen. Der Wasserdampfdruck der Hautoberfläche und die Wasserdurchgangszahl der Haut in Abhängigkeit von Temperatur und Wasserdampfdruck der umgebenden Luft im thermoindifferenten Bereich. Pflügers Arch. ges. Physiol. 261, 189-198, (1955)
- (19) Lütcke, A., Klussmann, F.W. u. Kaufmann, W.: Der insensible Gewichtsverlust als Funktion der Umweltbedingungen. Die Hautwasserabgabe des Hundes im Indifferenzbereich. Pflügers Arch. ges. Physiol. 265, 575-596, (1958)
- (20) Mali, J.: The Transport of Water through the Human Epidermis. J. Invest. Derm. 27, 451-460 (1956)
- (21) Marchionini, A. u. Spier, H.W.: Orthologie und Pathologie der Ausscheidung der Haut. Handbuch der allgemeinen Pathologie, 5, 527-548

- (22) Montagna, W.: The Struktüre and Function of Skin. (1962)
- (23) Palmes, E.: An Apparat and Method for the Continous Measurement of Evaporative Water Loss from Human Subjects. The review of scientific Instr. 19, 711, (1948)
- (24) Pirlet, K.: Eine Methode zur fortlaufenden Registrierung der Hautwasserabgabe in kleinen Hautarealen. Pflüg. Arch. Physiol. 273, 182-189, (1961)
- (25) Rothmann, S.: Physiology and Biochemistry of the Skin. Chicago, University of Chicago Press, 1954, p 26 ff and p 233 ff.
- (25) Schölmerisch, P. u. Hildebrandt, G.: Über Mechanismus und Regulation der Hautwasserabgabe (Mordellfieber). Zs. f. d. ges. exper. Med. 117, (1951)
- (29) Stüttgen, G.: Die normale und pathologische Physiologie der Haut. Gustav Fischer Verlag Stuttgart 1955, S. 237-241 ff
- (30) Thauer, R u. Zöllner, G.: Der Einfluß der relativen Feuchte der Luft auf den insensiblen Gewichtsverlust. Hess. Ärzteblatt, 8, (1953)
- (31) Wyndham, C.: Role of Skin and of core Temperature in man's Temperature Regulation. J. Appl. Physiol. 20 (1), 31-36, (1965)

Für die freundliche Überlassung des Themas, für die Arbeitsmöglichkeiten in ihrem Institut und für die wertvollen Anregungen und Hinweise bin ich Herrn Dipl. Phys. K. Dirnagl und Herrn Doz. Dr. H. Drexel sehr dankbar.

I.) Lebenslauf

Am 5. November 1941 wurde ich als Tochter des Ministerialrats Dr. Artur Heberlein und seiner Frau Marianne, geb. Krause, in Berlin geboren.

Nach vier Jahren Volksschule besuchte ich ab Ostern 1952 das Heidehof-Gymnasium in Stuttgart, wo ich am 6. März 1961 das Abitur machte.

Im Sommersemester des gleichen Jahres begann ich das Medizinstudium an der Universität Erlangen. Hier legte ich im Februar 1962 die Naturwissenschaftliche und im Juli 1963 die Ärztliche Vorprüfung ab. Das Wintersemester 1963/64 verbrachte ich in Innsbruck, das Sommersemester 1964 in Wien. Anschließend immatrikulierte ich mich an der Universität München und bestand hier am 16. Dezember 1966 das Staatsexamen.

